

ЗВ'ЯЗОК МІЖ ЗСУВАМИ КРИТИЧНОЇ ТЕМПЕРАТУРИ КРИХКОСТІ, ОТРИМАНИХ РІЗНИМИ МЕТОДАМИ ДЛЯ НАД ПРОЕКТНИХ ФЛЮЕНСІВ НЕЙТРОНІВ

М.Г. Голяк, Л.І. Чирко, О.В. Тригубенко, О.В. Шкапак

Інститут ядерних досліджень НАН України, Україна

Abstract. The main topic of the study is to determine relation between shifts of critical temperature of brittleness obtained by different methods within a range of long-term operation fluence. Using advanced methods of surveillance specimens reconstruction, dose dependences of critical temperatures of brittleness and reference temperatures for WWER-1000 RPV materials have been obtained. The Chow test was used to verify the homogeneity of the two samples. The results of the study showed that it is possible to combine the values of ΔT_F and ΔT_0 to obtain the reliable value of the irradiation embrittlement coefficient.

Корпус реактора є основним бар'єром безпеки реакторної установки та таким що не підлягає заміні, тому його стан фактично визначає ресурс всього енергетичного блоку. В Україні, як і в інших країнах, стан корпусу реактора, а саме здатність матеріалу КР чинити опір поширенню тріщин в умовах опромінення швидкими нейтронами, визначають за результатами випробувань на ударний вигин зразків-свідків типу Шарпі.

В документі МАГАТЕ “VERLIFE” (“NULIFE”) коефіцієнт радіаційного окрихчування A_F рекомендують визначати за даними результатів випробувань на ударний вигин зразків-свідків типу Шарпі та триточковий вигин зразків-свідків типу COD.

Температурна залежність ударної в'язкості, для зразків типу Шарпі має наступний вигляд:

$$KCV = \left(\frac{USE}{2} \right) \cdot \left(1 + \tanh \left(\frac{T - T_0}{C} \right) \right) \quad (1)$$

де KCV – ударна в'язкість (питома робота руйнування), USE – значення ударної в'язкості на верхньому шельфі температурної залежності, T – температура випробування; T_0 – температура, яка відповідає значенню ударної в'язкості; C – параметр, який характеризує нахил температурної залежності KCV .

Температурна залежність параметрів в'язкості руйнування (рівняння майстер кривої) для зразків типу COD:

$$K_{JC} = 30 + 70 \exp[0.019(T - T_0)] \quad (2)$$

де K_{JC} – коефіцієнт інтенсивності напруження. T_0 – температура, при якій медіана температурної залежності K_{JC} для зразків товщиною 25,4 мм дорівнює 100 МПа $\sqrt{м}$. Температурна залежність параметрів в'язкості руйнування в області крихко-в'язкого переходу однакова для всіх сталей феритного класу незалежно від хімічного складу, термообробки і структурного стану.

Для продовження безпечної експлуатації КР у надпроектний термін необхідно вияснити чи зберігається кореляція між ΔT_{KF} і ΔT_0 при великих флюенсах. Для перевірки однорідності двох вибірок використовували тест Чоу, який перевіряє гіпотезу що дві вибірки можуть бути об'єднані в одну при рівні значущості $\alpha=0,05$ та умові коли $F_{Чоу} < F_{кр}$.

Порівняння зсувів температур крихко-в'язкого переходу, отриманих різними методами показано на прикладі декількох блоків українських АЕС. Для Блоку А було проведено порівняльний аналіз як основного металу (ОМ) (рис.1) так і металу зварного з'єднання (МШ) (рис.2).

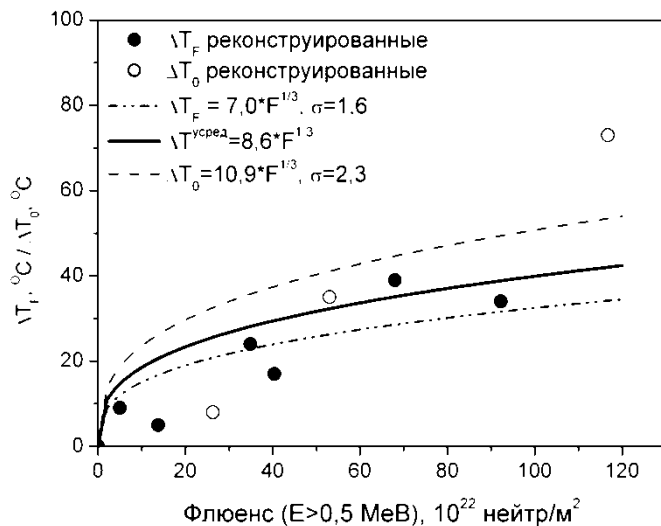


Рис.1. Порівняння зсувів температур крихко-в'язкого переходу, отриманих різними методами для основного металу КР Блоку А

Значення F-статистики складає 2,6 при критичному значенні 5,3, тобто виконується нерівність $F_{\text{Чоу}} < F_{\text{кр}}$. Тому дані дві вибірки можна вважати однорідними, та об'єднати в одну.

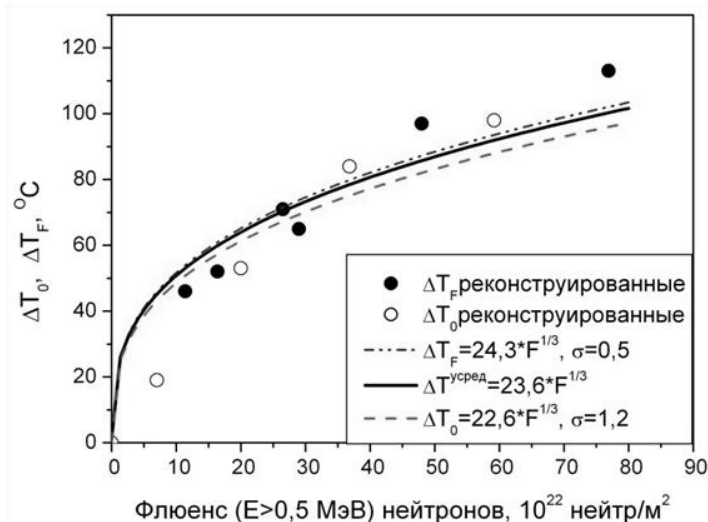


Рис.2. Порівняння зсувів температур крихко-в'язкого переходу, отриманих різними методами для металу зварного з'єднання КР Блоку А

Значення F-статистики складає 0,5 при критичному значенні 5,3, тобто виконується нерівність $F_{\text{Чоу}} < F_{\text{кр}}$. Тому дані дві вибірки можна вважати однорідними, та об'єднати в одну.

Схожа картина має місце і для іншого Блоку Б. Для основного металу (рис. 3а) значення F-статистики складає 2,13 при критичному значенні 4,66, тобто виконується нерівність $F_{\text{Чоу}} < F_{\text{кр}}$, а для металу зварного з'єднання (рис. 3б) значення F-статистики складає 0,22 при критичному значенні 4,6, тобто виконується нерівність $F_{\text{Чоу}} < F_{\text{кр}}$. Таким чином, для обох металів виконується нерівність Чоу, а отже вибірки вважаються однорідними.

Цікавим є дослідження кореляції двох методик для металу зварного з'єднання корпусу реактора Блоку В(рис.4). Цей блок найкращий з усіх ВВЕР-1000. Концентрація нікелю в МШ не перевищує 1,17%ваг, а марганцю 0,78%ваг. Внаслідок чистоти металу в основному металі практично відсутнє радіаційне окрихчування. Окрихчування металу зварного з'єднання також незначне – коефіцієнт радіаційного окрихчування значно нижчий від нормативного ($A_F = 11,5^\circ\text{C}$ при $A_F(\text{ПНАЕ}) = 20^\circ\text{C}$).

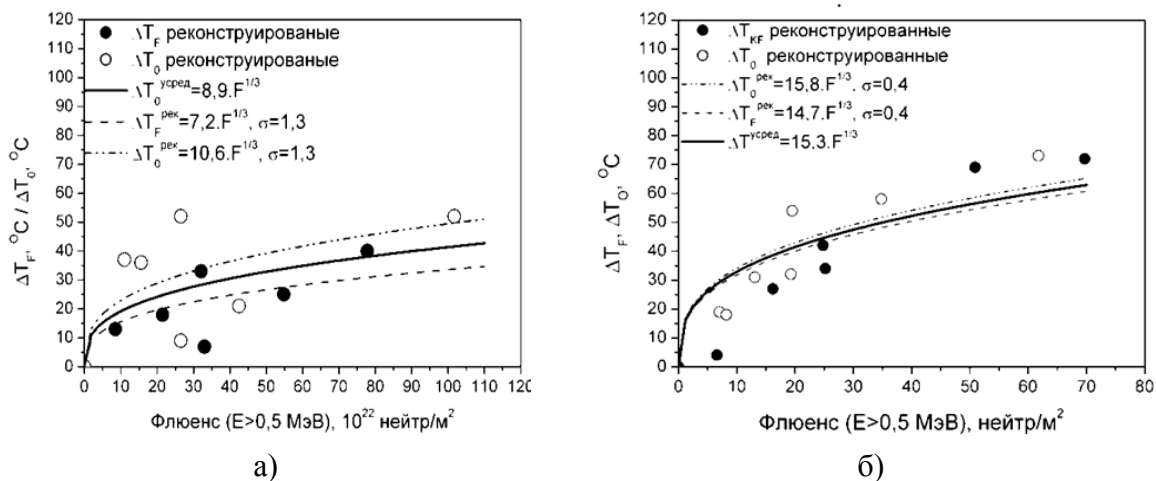


Рис.3. Порівняння зсувів температур крихко-в'язкого переходу, отриманих різними методами для а - ОМ КР Блоку Б, б - МШ КР Блоку Б

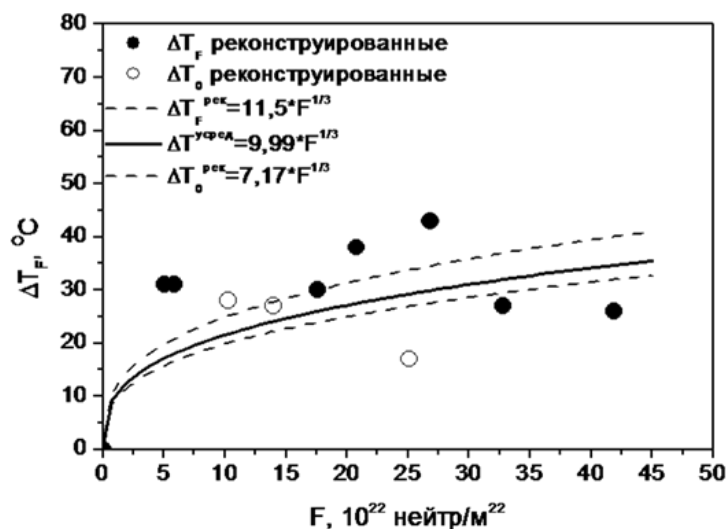


Рис.4. Порівняння зсувів температур крихко-в'язкого переходу, отриманих різними методами для металу зварного з'єднання КР Блоку В

Значення F-статистики складає 0,14 при критичному значенні 4,96, тобто виконується нерівність $F_{\text{чоту}} < F_{\text{кр}}$

Висновки. В роботі для металу корпусів реакторів ВВЕР-1000 досліджені дозові залежності зсувів перехідних температур ΔT_0 та ΔT_F , отриманих при випробуваннях зразків-свідків на триточковий та ударний вигини відповідно, при таких значеннях флюенсів, що відповідають понадпроектним термінам безпечної експлуатації.

Показано, що принаймні до накопичення флюенсу швидких ($E \geq 0.5$ MeV) нейтронів $\approx 100 \cdot 10^{22}$ нейтр/м² значення зсувів перехідних температур, отриманих різними методами випробувань, описуються однаковим законом. Таким чином, для визначення достовірного значення коефіцієнту радіаційного окрихчування A_F можна об'єднувати величини ΔT_F і ΔT_0 , отримані до накопичення флюенсів, що відповідають понадпроектним термінам безпечної експлуатації.

Література

1. ПНАЭ Г-7-002-86. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок / Госатомэнергонадзор СССР. – Москва, Энергоатомиздат – 1989 – 525 с.

E 1921-05 Standard Test Method for Determination of Reference Temperature, T_0 , for Ferritic Steels in the Transition Range. Annual Book of ASTM Standards, Volume 03.01, 2005.